

На правах рукописи

Самохин Дмитрий Сергеевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И
ПЕРСОНАЛА ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО НЕЧЕТКО-ВЕРОЯТНОСТНЫМ
МОДЕЛЯМ, УЧИТЫВАЮЩИМ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Автор:



Обнинск - 2012

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики – филиале
Федерального государственного автономного образовательного учреждения выс-
шего профессионального образования "Национальный исследовательский ядер-
ный университет "МИФИ"

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Волков Юрий Васильевич, ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ершов Геннадий Александрович,
ОАО Атомэнергопроект

доктор физико-математических наук, профессор
Загребаев Андрей Маркоянович,
НИЯУ МИФИ

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образователь-
ное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федераль-
ный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «26» 12 2012 г. в 15 час. 00 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «22» 11 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) включает в себя решение задачи по оценке показателей надежности оборудования ЯЭУ с целью выявления «слабых» мест конструкции, а также для обоснования продления срока службы оборудования, находящегося на завершающей стадии эксплуатации.

Материалы, вошедшие в диссертацию, получены в результате работ по оценке показателей надежности конкретных объектов:

- оборудования, предназначенного для вне реакторного хранения радиоактивных материалов на установках с ВВЭР серии В-320 (Балаковская АЭС);
- оборудования исследовательского реактора ВВР-ц (филиал научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова);
- персонала энергоблоков с реакторами ВВЭР при действиях в аварийных и переходных режимах.

Существующие статистические методы (метод максимального правдоподобия, байесовский подход) для решения задачи получения оценок показателей надежности оборудования и персонала АЭС при действиях в аварийных и переходных режимах не вполне удовлетворяют с инженерной точки зрения, т.к. могут привести к появлению количественных суждений, отличных от нуля, о вероятностях неосуществимых явлений, что в свою очередь является абсурдной ситуацией. Физико-статистические модели не могут описывать организационно-технические мероприятия (например, повышение дисциплины работников). Поэтому названные методы не могли быть применены в конкретных исследовательских ситуациях для оценки показателей надежности, и возникла необходимость в разработке новых подходов.

Основные ограничения вероятностного анализа безопасности связаны с недостатком статистических данных по отказам оборудования ЯЭУ, поэтому **актуальными** являются задачи, связанные с разработкой методов обоснования безопасности объектов ядерных технологий при рассмотрении редко отказывающих и не отказывающих элементов оборудования ЯЭУ.

Цель диссертации – разработка методов оценки показателей надежности персонала при действиях в аварийных и переходных режимах, а также оборудования объектов ядерной техники по результатам эксплуатации, повышающих достоверность получаемых оценок.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Детально изучен характер информации по отказам оборудования, предназначенного для вне реакторного хранения радиоактивных материалов на установках с реактором ВВЭР серии В-320, оборудования исследовательского реактора ВВР-ц, а также по ошибкам персонала при действиях на блочных щитах управления (БЩУ) в аварийных и переходных режимах, с целью определения возможности использования четкой и нечеткой информации в оценках показателей надежности оборудования ЯЭУ и вероятностей ошибок персонала.
2. Создана методика оценки показателей надежности оборудования ЯЭУ по данным об отказах любого характера за период эксплуатации, объединяющая вероятностно-статистический и нечетко-множественный подходы в таких оценках.

3. Разработанная методика дополнена моделью, позволяющей на основании эксплуатационного опыта строить численные прогнозы относительно возможного выхода из строя оборудования, отказы которого не были зафиксированы за прошедший период эксплуатации.
4. Выполнена оценка показателей надежности оборудования, предназначенного для внереакторного хранения радиоактивных материалов на установках ВВЭР серии В-320, оборудования исследовательского реактора ВВР-ц, персонала при действиях на БЩУ в аварийных и переходных режимах (Калининская АЭС).

Достоверность результатов работы подтверждается проведенными верификационными расчетами показателей надежности персонала при действиях в аварийных режимах на БЩУ Калининской АЭС, а также оборудования реактора ВВР-ц и АЭС с РУ В-320 Балаковской АЭС.

Научная новизна работы

- Разработан метод, позволяющий на основании эксплуатационного опыта, накопленного персоналом АЭС, строить численные прогнозы относительно возможных проявлений ошибок персонала и внеплановых остановов оборудования сложных систем (учитывается то, что отказ оборудования может быть следствием неправильных действий персонала), отказы которого не были зафиксированы за прошедший период эксплуатации.
- С использованием разработанного метода, объединяющего вероятностно-статистический и нечетко-множественный подходы, впервые получены комплексные количественные оценки показателей надежности оборудования ЯЭУ по данным эксплуатации любого характера (четкого и нечеткого), использованный подход позволяет не исключать из рассмотрения некорректно зафиксированную информацию по отказам, а рассматривать ее наравне с четко зафиксированной информацией, повышая достоверность получаемых оценок;
- Впервые с использованием разработанного метода квантификации экспертных суждений о надежности оборудования и персонала ЯЭУ получены оценки вероятностей ошибок персонала на основании опыта тренировок персонала на полномасштабных тренажерах.
- Разработан метод сокращения числа искомых параметров при построении распределения случайной величины для оценки параметров распределения Вейбулла, использованный при анализе статистики внеплановых остановов ВВР-ц.

Практическая ценность работы

- Разработанный метод, объединяющий статистическую обработку данных и экспертных опросов, позволил провести оценки показателей надежности элементов оборудования систем Балаковской АЭС (РУ В-320), содержащих радиоактивные вещества вне реактора: промежуточного узла хранения жидких радиоактивных отходов (ПУХ ЖРО), систему отверждения ЖРО и систему газоочистки (СГО).
- Проведен анализ данных по аварийным остановкам ВВР-ц с учетом как четкой (корректно зафиксированной), так и нечеткой (некорректно зафиксированной)

информации по отказам, на основе которой были получены оценки, важные для обоснования безопасности реактора.

- Выполнена оценка показателей надежности персонала при действиях на БЩУ в переходных и аварийных режимах. Экспертная оценка показателей надежности персонала основывалась на опыте тренировок на полномасштабных тренажерах БЩУ РУ В-320. Подобный подход позволил повысить качество и сократить временные затраты на получение оценок показателей надежности персонала. Результаты используются на Калининской АЭС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Комплекс методов и алгоритмов для оценки показателей надежности оборудования и персонала объектов ядерных технологий (ЯТ) с учетом нечеткой информации и результаты его использования при оценке показателей надежности оборудования, предназначенного для внереакторного хранения радиоактивных материалов на установке с ВВЭР серии В-320, оборудования исследовательского реактора ВВР-ц, а так же персонала при действиях на БЩУ в аварийных и переходных режимах.
2. Разработанный метод сокращения числа искомых параметров при построении распределений случайной величины для оценки параметров распределения Вейбулла, использованный при анализе статистики внеплановых остановов реактора ВВР-ц.
3. Методы анализа малоаварийного опыта эксплуатации оборудования, предназначенного для внереакторного хранения радиоактивных материалов на установках с ВВЭР серии В-320 и оборудования исследовательского реактора ВВР-ц, на основании сочетания статистической обработки данных и экспертных опросов.
4. Разработанные принципы организации экспертных опросов по надежности оборудования ЯЭУ и ошибкам персонала при действиях на БЩУ, а также методы квантификации экспертных суждений, примененные для оценки показателей надежности оборудования, предназначенного для внереакторного хранения радиоактивных материалов на установке с ВВЭР серии В-320, оборудования исследовательского реактора ВВР-ц, а также персонала при действиях на БЩУ в аварийных и переходных режимах энергоблоков.

Личный вклад автора:

- автор лично разработал метод, объединяющий статистическую обработку данных и результаты экспертных опросов, для получения показателей надежности оборудования ЯЭУ;
- в качестве ответственного исполнителя выполнил работы по оценке показателей надежности элементов оборудования систем Балаковской АЭС (РУ В-320), содержащих радиоактивных вещества вне реактора, а также провел анализ данных по аварийным остановам ВВР-ц с получением оценок, важных для обоснования безопасности реактора;
- лично автор разработал метод оценки показателей надежности персонала при действиях в переходных и аварийных ситуациях на БЩУ;

- в качестве ответственного исполнителя выполнил работы по оценке показателей надежности персонала при действиях на БЩУ в аварийном режиме «Несанкционированное закрытие быстрозапорного отсечного клапана (БЗОК)».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: VI и VII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (2003 и 2004 гг., г. Санкт-Петербург); VIII и IX Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (2003, 2005 гг., г. Обнинск); VI Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (2008 г., конференция «Росэнергоатом», г. Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научно-технических журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 166 страницах, содержит 25 рисунков, 42 таблицы, список цитируемой литературы из 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная и практическая значимость, сформулированы цель и решаемые задачи, представлены основные положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора.

В первой главе, которая носит обзорный характер, представлена общая постановка задачи со схематическим представлением процесса подготовки эксплуатационных данных по отказам оборудования АЭС к проведению расчетов показателей надежности, а также общие принципы существующих в настоящее время способов оценки показателей надежности оборудования ЯЭУ по данным о его эксплуатации. Обсуждены вероятностные методы оценок показателей надежности при малой статистике по отказам оборудования объектов ЯТ, рассмотрен вопрос целесообразности использования нечеткой информации по отказам.

Вторая глава посвящена рассмотрению задач анализа «корректной» или «четкой» эксплуатационной информации по отказам элементов оборудования ЯЭУ с целью получения их показателей надежности. Обсуждены возможности применения формальных конструкций из теории вероятностей, теории надежности и математической статистики при создании теоретических моделей для оценок показателей надежности сооружений и оборудования, а также персонала АЭС.

Обычно при обработке результатов испытаний и/или эксплуатации задаются каким-то законом надежности $P(t)$ – вероятностью безотказной работы в течение заданного времени t . Выбор этого закона является важным этапом, от которого зависит точность (достоверность) оценки надежностной характеристики. Для выбора закона надежности имеется не так много возможностей.

Поскольку реальное время располагается на положительной части числовой оси, то все законы распределения случайных величин, допускающие (хоть с малой вероятностью) отрицательные значения случайных величин, должны отклоняться

при выборе закона надежности как не отражающие механику протекающих явлений, приводящих к повреждению объектов ЯТ. В принципе, при создании моделей для оценки показателей надежности объектов ЯТ могут быть использованы, например, три закона распределения случайных величин: распределение Пуассона, распределение Вейбулла и гамма-распределение.

В работе представлено обоснование применимости законов распределения Пуассона, Вейбулла, гамма и экспоненциального как частного случая этих законов.

Второе название распределения Вейбулла – распределение экстремального значения – определяется тем, что оно описывает ситуацию со множеством причин отказов. В работах Кокса и Смита, а также в монографии Барлоу и Прошана показано, что случайная величина

$$t = \min_i \{Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_n\},$$

где Y_i – случайное время до отказа по i -й причине, которая наблюдалась бы, если запретить отказы всех типов, кроме i -го, распределена по Вейбуллу с плотностью распределения

$$f(t) = \alpha \rho (\rho t)^{\alpha-1} e^{-(\rho t)^\alpha}, \quad (1)$$

где, α - параметр форм-фактора, ρ - параметр потока событий (среднее число событий в единичном интервале времени)

Стандартные требования на Y_i – независимость и одинаковая распределенность почти всегда удовлетворяются на практике, т.к. зависимость этих величин означала бы зависимость причин отказов друг от друга, разная распределенность означала бы доминирование одной из причин над другими. И то, и другое означало бы плохое качество проектирования и/или изготовления объекта. Все причины должны приводить к отказам одинаково редко и не создавать лавинообразного процесса повреждения.

Таким образом, при многоканальности причин появления событий распределение интервалов времени между ними должно быть близко к распределению Вейбулла. Это распределение двухпараметрическое, поэтому для определения его параметров необходимо составить два уравнения.

Предложенный в работе метод оценки параметров распределения Вейбулла является развитием метода, предложенного Волковым Ю.В. для анализа безаварийного опыта эксплуатации объектов ЯТ. Суть этого метода состоит в том, что для оценки параметра экспоненциального распределения времени между отказами используется известный интервал времени t наблюдения за объектом и постулированная вероятность P_α того, что отказ должен был произойти в течение времени наблюдения, а безаварийная эксплуатация объекта – результат везения. В этом случае оценка среднего числа отказов в единицу времени может быть сделана по формуле

$$\lambda = -\frac{1}{t} \ln(1 - P_\alpha). \quad (2)$$

Заметим, что любая гипотеза о причине отказа в этом случае получит ненулевую оценку интенсивности ее реализации, и очень важно в этой ситуации положиться не только на чисто статистические данные, но и привлечь мнение специалистов.

Развитие метода оценки параметров распределения Вейбулла в диссертации состоит в том, что для оценок параметров используется та же идеология, но рассматривается ситуация, когда за время наблюдения t все же происходит один отказ в случайный момент времени $\tau \in [0, t]$. Следует отметить два момента.

1. Предложенный подход дает возможность консервативно оценить закон распределения времени до отказа объекта по любой возможной причине, а не только из-за реализовавшейся. Это вытекает из самой природы распределения Вейбулла.

2. По сравнению с экспоненциальным распределением применение распределения Вейбулла дает более осторожные оценки надежности объекта, если время прогноза невелико (не превышает оцененное среднее время между отказами), и, наоборот, более оптимистичные в противоположном случае.

При решении практической задачи, состоящей в получении в явном виде закона, описывающего распределение во времени отказов ВВР-ц по статистике за 40 лет, выполнено преобразование статистического ряда, позволяющее сократить число искомых параметров теоретического распределения. В свою очередь это позволяет упростить поиск наилучших значений параметров, сократить объем вычислений по методу максимального правдоподобия, однако возможна потеря точности расчетов из-за сокращения объема выборки. Суть метода в следующем.

Допустим, предполагаемая плотность распределения $f(t, a_1, \dots, a_l)$ случайной величины t имеет параметры a_1, \dots, a_l , подлежащие определению по выборке t_1, t_2, \dots, t_k объема k из этой случайной величины. Пусть удалось найти такое преобразование $z = \varphi(t)$, что плотность распределения $f(z, a_1, \dots, a_p)$ новой случайной величины z определяется меньшим количеством параметров, т.к. $p < l$. Тогда можно построить выборку некоторого объема n' , состоящую из выборочных значений

$$z_1 = \varphi_1(t_1, \dots, t_n)$$

.....

$$z_{n'} = \varphi_{n'}(t_1, \dots, t_n)$$

новой случайной величины z , зависящих от выборочных значений t_1, t_2, \dots, t_k исходной случайной величины t .

Если по этим новым выборочным значениями построить гистограмму распределения случайной величины z , то подбор по такой гистограмме теоретического распределения $f(z, a_1, \dots, a_p)$ осуществляется проще и легче, чем распределения $f(t, a_1, \dots, a_l)$ по гистограмме для исходной случайной величины t . При этом, чем больше разница $l - p$, тем более облегчается подбор.

Допустим, есть основания полагать (следует из описания распределения Вейбулла, приведенного выше), что случайные интервалы времени τ между событиями одинаково распределены по Вейбуллу (1). Составим сумму из двух соседних таких интервалов $t = \tau + u$ и отношение

$$u = \frac{t}{\tau} = 1 + \frac{y}{\tau} \quad (3)$$

Найдем закон распределения случайной величины u при известных законах распределения случайных величин u и τ . Обозначим $z = u/\tau$. Тогда $u = 1 + z$.

Предположим, что u и τ независимы и одинаково распределены по Вейбуллу (1). Плотность распределения $f_z(z)$ их отношения z можно найти из интегрального выражения:

$$f_z(z) = \int_0^{\infty} x f_y(zx) f_{\tau}(x) dx, \quad (4)$$

где $f_y(y)$, $f_{\tau}(\tau)$ – плотности распределения y и τ , соответственно. Подстановка в формулу (4) конкретных распределений вида (1) приводит к выражению

$$f_z(z) = \begin{cases} \frac{\alpha z^{\alpha-1}}{(z^{\alpha} + 1)^2} & z > 0 \\ 0 & z \leq 0 \end{cases}.$$

Отсюда

$$f_u(u) = \begin{cases} \frac{\alpha(u-1)^{\alpha-1}}{[(u-1)^{\alpha} + 1]^2} & u > 1 \\ 0 & u \leq 1 \end{cases}. \quad (5)$$

Разобьем весь период времени наблюдения за событиями на временные интервалы следующим образом. Пусть t_i – время между $(i-1)$ и $(i+1)$ – аварийными остановами, и пусть в момент времени $\tau_i \in [0, t_i]$ происходит i -е событие (рис. 1).

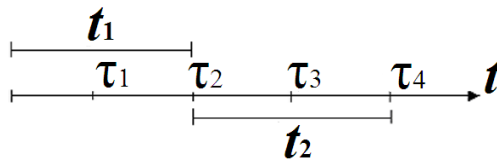


Рис. 1. Представление потока событий для построения независимых выборочных значений отношения (5): t – условное время наблюдения за объектом; τ – момент времени отказа объекта в интервале $[0, t]$

Таким образом, $t_i = \tau_{2i-1} + \tau_{2i}$ состоит из двух соседних промежутков времени между отказами. Заметим, что t_i и t_{i+1} не содержат общих интервалов времени, и поэтому независимы. Составим отношения $u_i = t_i / \tau_{2i-1}$, и таким образом получим независимые выборочные значения новой случайной величины u с законом распределения (5), определяемым только одним параметром α , в отличие от исходного двухпараметрического закона распределения Вейбулла.

В табл. 1 сведены оценки параметров α и ρ распределения Вейбулла, полученные помимо представленного подхода непосредственно по выборке аварийных остановов ВВР-ц (метод моментов), а также классическим способом построения гистограммы с последующей аппроксимацией распределением Вейбулла (исходный статистический ряд). Видно, что все они в пределах погрешностей согласуются между собой.

В **третьей главе** представлена оценка показателей надежности оборудования и персонала ЯЭУ с учетом результатов экспертных опросов.

Известны и применяются два подхода к оценке показателей надежности оборудования ЯЭУ.

1. Статистический, применяемый к данным эксплуатации и/или испытаний.
2. Физико-статистические модели, применяемые при отсутствии статистических данных, т.е. при проектных оценках, прогнозировании ресурса в условиях отсутствия достаточных эксплуатационных данных.

Важно отметить, что:

- при отсутствии отказов, или даже если за время наблюдения произошел один отказ, весьма полезно дополнить чисто статистические методы, подходом, позволяющим учитывать информацию об объекте исследования, полученную в ходе экспертного опроса специалистов, непосредственно работающих с оборудованием;
- часто невозможно описать физико-статистическими моделями все меры, применяемые для обеспечения надежности и безопасности ЯЭУ.

Таблица 1

Сводные данные по результатам оценок параметров распределения Вейбулла различными методами

Метод Параметр	Сокращение числа параметров (± среднеквадратичное отклонение)	Исходный статистический ряд (± среднеквадратичное отклонение)	Метод моментов (± доверительный интервал)
α	$\bar{\alpha} = 0,74 \pm 0,01$	$\bar{\alpha} = 0,72 \pm 0,02$	$\alpha = 0,76,$ $\alpha_{\min} = 0,67$ $\alpha_{\max} = 0,85$
ρ [1/(реактор·сутки)]	$\bar{\rho} = 0,011 \pm 0,001$	$\bar{\rho} = 0,01 \pm 0,01$	$\rho = 1,16 \cdot 10^{-2}$ $\rho_{\min} = 0,95 \cdot 10^{-2}$ $\rho_{\max} = 1,40 \cdot 10^{-2}$

Если не учитывать такие особенности в условиях, при которых приходится делать оценки, можно получить заведомо завышенные численные суждения для возможности проявления во времени физически неосуществимых явлений (избыточный консерватизм).

В этой связи в дополнение к двум уже существующим подходам автором предложен подход, использующий не только статистические данные эксплуатации оборудования, но и количественные оценки мнений квалифицированных экспертов в отношении опыта эксплуатации этого оборудования.

Основная отличительная черта предлагаемого подхода: в дополнение к числовым переменным используются нечеткие величины и так называемые лингвистические переменные.

Допустим, мы можем выставить количественную оценку мнениям экспертов в отношении возможности отказа какого-либо элемента оборудования за конечное время в виде числа $\mu \in [0,1]$, характеризующего степень такой возможности, а также по без/мало аварийному опыту эксплуатации оценить фактическую интенсивность отказа этого оборудования $\lambda_{i,\phi}$.

Тогда, если известна нормативная величина $\lambda_{i,n}$, заданная, например, в общих положениях обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ), то, разумнее всего найти средневзвешенное значение по формуле

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_{i,n} (1 - \mu_i) + \lambda_{i,\phi} \mu_i, \quad (6)$$

где, множителем $1-\mu$ учитывается мнение экспертов о том, что отказ произойдет когда-нибудь потом, через время, которое они не в состоянии оценить. Такой подход даст возможность оценивать показатели надежности оборудования в слу-

чаях отсутствия или малой статистики по отказам и в условиях невозможности составить физико-статистические модели процесса эксплуатации оборудования.

Отметим еще раз, что предлагаемый подход – не альтернатива существующим методам, а дополнение к ним для случаев, когда они бессильны или неэффективны.

При оценке нечеткой информации перед исследователем встают две задачи: определение причины отказа системы и определение неизвестного показателя надежности.

Определение неизвестной причины отказа системы

Предложено реализовать следующий метод экспертных оценок для определения причины с максимальной ее «причастностью» к отказу всей системы.

Процедура экспертного опроса делится на следующие этапы.

Первый этап. Организаторы опроса выдвигают несколько предположений о том, что явилось, по их мнению, главной причиной нарушения нормальной эксплуатации рассматриваемой системы. Выдвинутые предположения фиксируются в таблице опросного листа экспертов. Там же приводится вся имеющаяся информация по отказу из оперативного журнала об отказах оборудования.

Второй этап заключается в подборе группы экспертов. Экспертная группа составляется на основании РД-03-13-94 №41 (Положение по организации и проведению экспертизы проектных и других материалов и документации, обосновывающих безопасность ядерно- и радиационно опасных объектов и производств. Утверждено приказом Госатомнадзора России).

Третий этап заключается в проведении самого опроса экспертов. В ходе опроса каждый эксперт выставляет оценку из интервала $[0;1]$ для каждой i -й причины отказа системы, выражая свою уверенность в том, что главной причиной выхода из строя рассматриваемой системы стала именно i -я. Выставляя оценку «0» эксперт выражает свое полное несогласие с тем, что данная причина могла вызвать возникновение отказа системы, и наоборот, выставляя оценку «1» эксперт выражает свою полную уверенность в том, что данная причина могла вызвать возникновение отказа рассматриваемой системы. Соответственно выставляя некоторую промежуточную оценку (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; ...) эксперт показывает степень уверенности при принятии решения по данному вопросу.

Четвертый этап. Проводится анализ результатов экспертного опроса m специалистов. На основе экспертных оценок предыдущего этапа рассчитывается степень принадлежности события к отказу системы:

$$\tilde{\mu}_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j, \quad (7)$$

где m – число экспертов, i – рассматриваемый элемент (причина отказа), k_j – коэффициент компетентности j -ого эксперта, x_{ij} – оценка j -ого эксперта каждой причины отказа.

Информация, полученная от экспертов, должна быть тщательно проверена на согласованность мнений экспертов, поскольку результаты работы группы экспертов неизбежно будут содержать отпечаток субъективизма, вносимого как самими экспертами, так и организаторами экспертного опроса. Это является неизбежной

платой за возможность получить количественные оценки там, где раньше ограничивались лишь качественным описанием. Поэтому обработка результатов экспертного опроса включает оценку степени согласованности мнений экспертов и выявление причин неоднородности. Только при согласованности мнений экспертов можно утверждать, что в результате экспертизы получена достоверная информация.

Определение согласованности группы экспертов производится посредством определения коэффициента конкордации. При значении коэффициента конкордации больше или равном 0,8 группа экспертов считается хорошо согласованной.

Групповая оценка (7) является средневзвешенным значением функции принадлежности.

Коэффициент компетентности является нормированной величиной:

$$\sum_{j=1}^m k_j = 1. \quad (8)$$

Коэффициенты компетентности экспертов можно вычислить по апостериорным данным, т.е. по результатам оценки рассматриваемых событий, входящих в список причин отказа системы. Основной идеей этого вычисления является предположение о том, что компетентность эксперта должна оцениваться по степени согласованности его оценок с групповой оценкой объектов.

Алгоритм вычисления коэффициентов компетентности экспертов имеет вид рекуррентной процедуры.

Пятый этап. Все рассмотренные возможные причины отказа системы расставляются по приоритетам: первой возможной причиной считается имеющая самую большую степень принадлежности, и так расставляются все причины по мере убывания степени принадлежности.

Определение неизвестного показателя надежности

Предположим, установлено, что причиной отказа системы, явился отказ какого-то ее элемента, а показателя его надежности в справочниках нет. Предположим также, что длительность работы элемента в составе системы из описания ее отказа определить невозможно. В этой ситуации также плодотворной может оказаться процедура экспертного опроса с последующей числовой обработкой ее результатов, использующей методы теории нечетких множеств для анализа лингвистических переменных.

Здесь следует отметить, что значений лингвистических переменных и их комбинаций так много, что отобразить все возможные случаи в опросном листе не представляется возможным.

Наиболее приемлемой, по-нашему мнению, является процедура учета лингвистических переменных, представляющих собой высказывания типов «ограничение» и «цель» с использованием числовых значений. Примерами высказываний типа «цель» могут служить следующие: «наработка на отказ компрессора должна быть $3 \cdot 10^5$ ч» или «расходомер был поставлен в работу 25.05.1995». В свою очередь, высказывания типа «ограничение» могут быть двух видов: высказывания, определяющие нижнюю границу исследуемой величины (например, «наработка на отказ компрессора должна быть не меньше $3 \cdot 10^5$ ч» или «расходомер был по-

ставлен в работу не ранее, чем 25.05.1995»), и высказывания, определяющие верхнюю границу (например, «наработка на отказ компрессора должна быть не больше $3 \cdot 10^5$ ч» или «расходомер был поставлен в работу не позднее, чем 25.05.1995»).

Таким образом, в ходе проведения опроса группы экспертов имеет смысл ограничиться использованием следующих *высказываний*: «...значение должно быть близко к ...», «предполагаемое значение исследуемой величины должно быть больше чем ...», «предполагаемое значение исследуемой величины должно быть не больше чем ...» и т.п.

На следующем этапе экспертной группе предлагается оценить степень корректности каждой лингвистической переменной, проставив оценку из интервала $[0;1]$. Процедура проставления оценки аналогична описанной в предыдущем пункте.

На основе экспертной оценки определяются степени предпочтительности рассматриваемого *высказывания* $\mu_{\alpha i}$ (цель), $\mu_{\beta i}$ (верхнее ограничение), $\mu_{\gamma i}$ (нижнее ограничение), а точнее наработок на отказ α_i , β_i , γ_i , взятых из соответствующих экспертных *высказываний*:

$$\mu_{\alpha i} = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j \quad i = \overline{1, f}, \quad (9)$$

$$\mu_{\beta i} = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j \quad i = \overline{1, d}, \quad (10)$$

$$\mu_{\gamma i} = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j \quad i = \overline{1, g}, \quad (11)$$

где m – число экспертов; k_j – коэффициент компетентности j -ого эксперта, определяется из рекуррентной процедуры; x_{ij} – оценка j -ого эксперта значения i -ой переменной.

Далее необходимо определить: α – значение наработки на отказ, определяющее цель; β – значение наработки на отказ, определяющее нижнее ограничение; γ – значение наработки на отказ, определяющее верхнее ограничение. Это можно сделать используя типовые виды функций принадлежности, применяемые в теории нечетких множеств. При этом функция принадлежности для цели A получает вид

$$\mu_A(z) = \exp \left[- \frac{(z-\alpha)^2}{2b^2} \right] \quad (12)$$

где, b - параметр форм-фактора.

Нижнее ограничение β и верхние ограничения γ могут быть представлены соответственно в виде следующих функций принадлежности:

$$\mu_{\beta}(z) = \begin{cases} [1 + [a(z - \beta)]^{-1}]^{-1}, & \text{при } z > \beta; \\ 0, & \text{при } z \leq \beta. \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{\gamma}(z) = \begin{cases} [1 - [a(z - \gamma)]^{-1}]^{-1}, & \text{при } z < \gamma; \\ 0, & \text{при } z \geq \gamma. \end{cases} \quad (14)$$

Параметры функций (12) – (14), можно оценить, например, методом наименьших квадратов (МНК), используя результаты опроса $\mu_{\alpha i}$, $\mu_{\beta i}$, $\mu_{\gamma i}$.

Далее, в зависимости от полученных данных и требований к качеству результата оценок наработку на отказ θ , можно поступить двумя способами.

1. Если оценщику требуется получить наилучшую оценку, удовлетворяющую только вместе и цели A , и нижнему ограничению B , и верхнему ограничению Γ , то строится функция принадлежности вида

$$\mu(z) = \mu_A(z)\mu_B(z)\mu_\Gamma(z) \quad (15)$$

Если какая-либо из лингвистических переменных (A , B , Γ) отсутствует, то в формуле (15) соответствующей функции принадлежности присваивается значение 1 для всех z .

2. Часто возникают ситуации, когда эксперты не могут сформулировать твердое суждение о предмете в виде цели. Поэтому в таблице опроса оказываются только лингвистические переменные в виде ограничений. В этом случае допустимы следующие определения функции принадлежности

$$\mu(z) = \mu_B(z)\mu_\Gamma(z) \quad (16)$$

и

$$\mu(z) = \mu_{B \cap \Gamma}(z) = \min\{\mu_B(z), \mu_\Gamma(z)\} \quad (17)$$

Вне зависимости от выбора вида $\mu(z)$ ((15), (16) или (17)) ищется

$$\mu(z^*) = \max_z(\mu(z)) \quad (18)$$

Величина z^* из соотношения (18), доставляющая максимум функции $\mu(z)$, является наилучшей оценкой наработки на отказ θ , и она может быть разной для функций принадлежности, определяемых по формулам (15), (16) или (17).

Способ улучшения качества и повышения достоверности оценок показателей надежности очень надежного оборудования

Предложенный в работе способ получения оценок показателей надежности оборудования и персонала АЭС обсужден выше.

Следует отметить, что часто бывает так, что в справочных материалах отсутствует нормативная величина $\lambda_{i,n}$. В этом случае принимаем $\lambda_{i,n}=0$ и, следовательно, выражение (6) приобретает вид $\bar{\lambda}_i = \lambda_{i,\phi}\mu_i$.

Результаты оценок показателей надежности

1) Оборудование, предназначенное для внереакторного хранения радиоактивных материалов на энергоблоках с реактором ВВЭР серии В-320 (Балаковская АЭС).

В табл. 2 представлены результаты оценок показателей надежности оборудования промежуточного узла хранения жидких радиоактивных отходов, системы отвержения ЖРО и системы спецгазоочистки Балаковской АЭС. Данные получены с применением разработанного метода экспертных опросов для оценок показателей надежности оборудования, отказы которого не зафиксированы.

Группе специалистов/экспертов был задан вопрос: «Нарушение нормальной эксплуатации (вплоть до отказа) какого оборудования обозначенной системы наиболее вероятно в процессе эксплуатации?».

По каждой системе было получено от шести до одиннадцати предположений о возможной причине ее отказа. Для дальнейшего анализа были выбраны причины (оборудование), обладающее, по мнению экспертной группы, наибольшей степенью принадлежности к отказу системы.

Результаты анализа показателей надежности оборудования, предназначенного для вне реакторного хранения радиоактивных материалов на установках с реактором ВВЭР серии В-320

Искомая величина	Гидроэлеватор перекачки пульпы (система ПУХ ЖРО)	Дроссель блока подачи раствора (система отвержения ЖРО)	Нагреватель контура регенерации (система спецгазоочистки)
t – время эксплуатации объекта	21 год	8 лет	21 год
$\bar{\lambda} = -\ln(1 - P_{\alpha})/t$	$3,3 \cdot 10^{-2}$ [1/год]	$8,7 \cdot 10^{-2}$ [1/год]	$3,3 \cdot 10^{-2}$ [1/год]
Средняя наработка на опасный отказ без учета мнения экспертной группы	30,3 лет	11,5 лет	30,3 лет
μ – степень принадлежности	0,48	0,48	0,71
$\bar{\lambda} = \lambda_{\phi} \mu$	$1,58 \cdot 10^{-2}$ [1/год]	$2,77 \cdot 10^{-2}$ [1/год]	$2,34 \cdot 10^{-2}$ [1/год]
Средняя наработка на опасный отказ с учетом мнения экспертной группы	63 года	36 лет	42 года

Следует отметить, что значение средней наработки на опасный отказ, полученное с учетом мнений специалистов, имеющих многолетний опыт эксплуатации оборудования, является более оптимистическим, чем соответствующая величина, полученная только лишь на основании безаварийного опыта эксплуатации, и, по мнению автора работы, достоверно отражает возможность дальнейшей безаварийной эксплуатации исследуемого оборудования.

2) Оборудование исследовательского реактора ВВР-ц

На рассмотрение была принята эксплуатационная информация за период работы реактора ВВР-ц с 25 марта 1965 по июль 2004 г. Следует отметить, что за весь период наблюдения в журналах по отказам оборудования не было обнаружено данных с нечетко зафиксированным временем отказа.

В свою очередь было зафиксировано 6 отказов систем с неизвестной причиной. Для данных отказов было необходимо, посредством экспертного опроса, определить неизвестный элемент, отказ которого привел к выходу из строя всей системы, и с учетом полученных данных и известных (четко зафиксированных) данных определить показатели надежности этого элемента.

В табл. 3 представлены результаты анализа данных по аварийным остановам ВВР-ц для определения их причин и оценки интенсивности отказов некоторых важных для безопасности элементов оборудования реактора ВВР-ц с учетом нечеткой информации по отказам.

Таблица 3

Показатели надежности важных для безопасности элементов оборудования реактора ВВР-ц

№ п/п	Элемент и комментарии к формулам	Интенсивность отказов с учетом мнения экспертной группы 1/сут	Интенсивность отказов без учета мнения экспертной группы 1/сут
	1	2	3
1	Камера автоматического регулирования	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$2,16 \cdot 10^{-4}$
2	Усилитель аварийной защиты №1	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$
3	Усилитель аварийной защиты №2	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$
4	Усилитель аварийной защиты №3	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$
5	Усилитель реактора (система сравнения «нейтронной энергии» с эталонной)	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$
6	В формулах: k – отказы, зафиксированные в четком виде; m – отказы, выявленные посредством экспертных опросов; θ – время между отказами	$\lambda = \frac{k + \sum_{j=1}^m \mu_j}{\sum_{i=1}^{k+m} \theta_i}$	$\lambda = \frac{k + m}{\sum_{i=1}^{k+m} \theta_i}$
7	Компенсатор давления	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$
8	Датчик давления среды первого контура	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$
9	Преобразователи давления	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$
10	Формулы определения интенсивности отказа при безаварийном опыте эксплуатации	$\lambda = -\frac{1}{t} \ln(1 - P_\alpha) \cdot \mu$	$\lambda = -\frac{1}{t} \ln(1 - P_\alpha)$

Следует отметить, что для элементов 1–5 (см. табл. 3) в оперативном журнале была зафиксирована информация по отказам как в четком, так и в нечетком виде. Соответственно для расчета параметра потока отказа элементов 1–5 использовались выражения из строки 6 в табл. 3. Для элементов 7–9 в табл. 3 отсутствовали данные по отказам в четкой форме, следовательно, для расчета λ были использованы выражения, представленные в строке 10 в табл. 3.

Из полученных результатов видно, что параметры потоков отказа, полученные с учетом мнения экспертной группы, являются более оптимистичными, чем консервативные оценки, полученные по чисто статистическому подходу.

3) Персонал энергоблоков с реакторами ВВЭР при действиях в аварийных и переходных режимах

Перед автором работы была поставлена задача оценить частоты возникновения ошибок персонала при действиях на БЩУ в аварийных и переходных режимах ядерных энергоблоков. Исследование проводилось на тренажерах учебно-тренировочного пункта (УТП) Калининской АЭС. Следует отметить, что по результатам тренировок статистика по ошибкам персонала не ведется, т.к. нет нормативных требований на ведения такого рода статистики.

Группе экспертов было предложено указать возможные ошибки персонала при действии в аварийной ситуации: «Несанкционированное закрытие быстрозапорного отсечного клапана (БЗОК)», а также по приведенной выше методике оценить частоты появления ошибок. В табл. 4 представлены заключительные данные проведенного исследования. Следует отметить, что для каждого наименования действия от экспертов было получено от трех до шести наименований ошибок персонала; в табл. 4 представлено по одному наименованию ошибки персонала для каждого действия персонала, обладающего наибольшей степенью уверенности экспертов в возникновении ошибки такого рода.

Таблица 4

Расчетные данные по оценке частот появления ошибок персонала при действиях в аварийной ситуации «Несанкционированное закрытие БЗОК»

Наименование действия	Наименование ошибки персонала	Коэффициенты компетентности экспертов	Степень согласованности экспертной группы	Степень уверенности экспертов в возникновении ошибки	Частота появления ошибки
Считывание информации	Пропущен сигнал об уменьшении расхода питательной воды на парогенератор	$k_1=0,26, k_2=0,25$ $k_3=0,26, k_4=0,23$	0,73	0,80	70/100
Диагностика состояния установки	Не замечено уменьшение расхода питательной воды	$k_1=0,26, k_2=0,24$ $k_3=0,27, k_4=0,23$	0,77	0,71	60/100
Принятие решения	Неверное решение об остановке ГЦН	$k_1=0,26, k_2=0,29$ $k_3=0,19, k_4=0,26$	0,79	0,82	33/100
Действие, реализующее решение	Неполное выполнение обязательной последовательности действий	$k_1=0,26, k_2=0,25$ $k_3=0,25, k_4=0,24$	0,84	0,54	61/100

Экспертный опрос был проведен отдельно для инструкторов на тренажерах УТП Калининской АЭС, а также оперативного персонала смены блока №3 в период тренировок на тренажере блока № 3.

В табл. 5 приведены данные по результатам проведенных двух опросов. Руководствуясь принципом невмешательства в работу экспертов, организаторы не выдвигали никаких требований по нормировке на какую-либо величину мнений экспертов в отношении частот ошибок. Поэтому суммы частот, имеющих наибольшие степени уверенности экспертов по всем четырем типам ошибок, в каждом из опросов не равны единице (строка ИТОГО в таблице).

Таблица 5

Результаты сравнения данных экспертных опросов и обработки информации по инцидентам

№ п/п	Тип действия	Инструкторы		Обучаемые	
		F_i	ω_i	F_i	ω_i
1	2	3	4	5	6
1	Считывание информации	0,70	0,31	0,06	0,09
2	Диагностика состояния	0,60	0,27	0,10	0,16
3	Принятие решения	0,33	0,15	0,30	0,47
4	Действия, реализующее решение	0,61	0,27	0,18	0,28
	Итого	2,24		0,64	

В столбцах номер 4 и 6 в табл. 5 приведены данные по оценкам относительных частот по формуле

$$\omega_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^4 F_j},$$

где F_i – частота (относительное число ошибок i -го типа на 100 инцидентов) с максимальной степенью уверенности данной группы экспертов (столбцы 3 и 5).

Группы экспертов условно названы «инструкторы» (инструкторы на тренажерах УТП Калининской АЭС) и «обучаемые» (персонал второй очереди, прошедший плановую подготовку в УТП).

Из табл. 5 видно следующее:

1. В целом «Обучаемые» дали абсолютные оценки частот ошибок меньшие, чем «Инструкторы» (см. строку ИТОГО). Однако для ошибок при принятии решения обе группы выставили примерно одинаковые оценки частот. Эти факты, по видимому, можно объяснить так:

- инструкторы УТП имеют производственный опыт с пультами энергоблоков первой очереди, и при выставлении оценок подсознательно учитывали и его, а

оперативный персонал с блока № 3 (в основном, молодые люди) ориентировались на новое поколение БЩУ;

- оценки частот ошибок при принятии решения примерно одинаковы у обеих групп ввиду того, что частота такого типа ошибки, прежде всего, определяется уровнем подготовки, дисциплины и опытности персонала, а не техникой, с которой он работает.

2. «Инструкторы» дают наибольшие абсолютную и относительную долю ошибкам при считывании информации, а «обучаемые» наоборот – наименьшую. Это, так же как и уменьшение сумм абсолютных частот, свидетельствует о лучшем соответствии нового поколения БЩУ фундаментальному техническому принципу обеспечения безопасности АЭС – «Человеческий фактор».

3. У «обучаемых» существенно увеличился, по сравнению с «инструкторами», относительный вклад ошибок при принятии решений, т.е., по мнению этой группы экспертов, с новым БЩУ безопасность при управлении энергоблоком стала больше зависеть от интеллекта человека и его культуры безопасности.

4. Появление нового поколения БЩУ приведет к смещению проблем эксплуатации из области технического оснащения пультов и связанных с этим проблем, например, считывания информации, в область проблем отбора оперативного персонала по уровню подготовки и способности вовремя концентрироваться и принимать правильные решения.

5. С появлением новых БЩУ, по-видимому, следует ожидать снижения интенсивности ошибок персонала типа «ошибка считывания информации» примерно в 3–4 раза по сравнению с оцененной по предыдущей статистике инцидентов, интенсивность ошибок остальных типов, скорее всего, мало изменится.

Основные выводы

1. В дополнение к двум существующим (статистические и физико-статистические методы) создан новый нечетко-вероятностный метод оценок показателей надежности элементов оборудования и персонала объектов ЯТ, позволяющий не исключать из рассмотрения нечеткую информацию по отказам, а учитывать ее наравне с четко зафиксированной информацией путем квантификации экспертных суждений.
2. Предложен способ объединения методов статистической обработки данных и экспертных опросов для получения единой оценки показателей надежности оборудования ЯЭУ. Этот способ реализован при оценке показателей надежности оборудования, предназначенного для внереакторного хранения радиоактивных материалов на установках с ВВЭР серии В-320, и оборудования исследовательского реактора ВВР-ц.
3. Разработан и использован для оценок показателей надежности оборудования реактора ВВР-ц метод сокращения числа искомых параметров при построении распределения случайной величины для оценки параметров распределения Вейбулла при анализе данных эксплуатации ЯЭУ.
4. Возможности разработанных методов продемонстрированы при оценке показателей надежности оперативного персонала при действиях на тренажерах БЩУ, расположенных в УТП Калининской АЭС, в переходных и аварийных режимах.

5. С помощью разработанных методов, объединяющих вероятностно-статистический и нечетко-множественный подходы проведены оценки показателей надежности оборудования, эксплуатируемого на реакторной установке ВВР-ц и АЭС с РУ В-320.
6. Впервые разработанный метод оценок показателей надежности элементов оборудования и персонала объектов ЯТ позволяет количественно оценивать качество проектных решений, эксплуатации и обслуживания ЯЭУ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Костерев В.В. Нечетко-вероятностные модели в оценках показателей надежности объектов ядерных технологий // В сб.: Доклады VI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, г. Санкт-Петербург, 2003. –Т. 1. – С. 227–230.
2. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Костерев В.В., Кочнов О.Ю. Нечетко-вероятностная модель в оценке показателей надежности аварийной защиты ВВР-ц // В сб.: Доклады VII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, г. Санкт-Петербург, 2004. –Т. 1. – С. 139–143.
3. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Нечетко вероятностные модели в оценках показателей надежности оборудования реакторных установок // Известия вузов. Ядерная энергетика. –2006. – № 3. – С. 12–23.
4. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Разработка теоретических основ анализа нечеткой информации по авариям на объектах с делящимися материалами // В сб.: Доклады VIII Международной конференции по безопасности АЭС и подготовка кадров, г. Обнинск, 6–8 октября 2003. – С. 119–123.
5. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Разработка теоретических основ анализа эксплуатационной информации любого характера по отказам оборудования АЭС // В сб.: Доклады IX Международной конференции по безопасности АЭС и подготовка кадров, г. Обнинск, 24–28 октября 2005. –Ч. 2. – С. 62–63.
6. Самохин Д.С., Некрасов В.Н. Методика определения закона распределения времени безотказной работы оборудования АЭС по результатам эксплуатации // В сб.: Доклады IX Международной конференции по безопасности АЭС и подготовка кадров, г. Обнинск, 24–28 октября 2005. –Ч. 1. – С. 68–69.
7. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Метод определения вида и параметров распределений случайных величин по эксплуатационным данным с объектов ядерной энергетике // Известия вузов. Ядерная энергетика. –2007. – № 4. – С. 15–23.
8. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Обеспечение консервативности оценок показателей надежности объектов ядерных технологий при малой статистике по отказам // Известия вузов. Ядерная энергетика. –2008. – № 1. – С. 9–16.
9. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Соболев А.В., Шкаровский А.Н. Разработка методов и оценка показателей надежности персонала по статистике инцидентов на АЭС РФ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 15–24.
10. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Соболев А.В. Разработка методов и оценка показателей надежности персонала при действиях в переходных и аварийных режимах // В сб.: Доклады IV Международной научно-технической конференции

по безопасности, эффективности и экономике атомной энергетики, г. Москва, 2008.– С. 103–110.

11. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Соболев А.В., Канышев М.Ю., Лычаков С.Л., Слынев С.Н. Результаты разработки методов экспертного опроса и оценки с их помощью показателей надежности персонала энергоблока АС при действиях в переходных режимах // Известия вузов. Ядерная энергетика. –2009. – № 1. – С. 116–124.
12. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Кочнов О.Ю. Экспертный опрос как средство улучшения качества оценок показателей надежности очень надежного оборудования // Ядерная физика и инжиниринг. – 2010. – Т. 1. – № 6. – С. 489-493.
13. Самохин Д.С. проблемы оценки показателей надежности оборудования и персонала ядерных энергетических установок в свете возрастающих требований к отказоустойчивости // Ядерная физика и инжиниринг. – 2010. – Т. 1. – № 6. – С. 483-488.

Компьютерная верстка Д.С. Самохин

ЛР № 020713 от 27.04.1998

Подписано к печати

Формат бумаги 60×84/16

Печать ризограф.

Бумага МВ

Печ. л. 1,25

Заказ №

Тираж 80 экз.

Цена договорная

Отдел множительной техники ИАТЭ
249035, г. Обнинск, Студгородок, 1